

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
15. Januar 2004 (15.01.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/005982 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: G02B 6/00

(74) Anwalt: EISENFÜHR, SPEISER & PARTNER; Anna-
Louisa-Karsch-Strasse 2, 10178 Berlin (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2003/007183

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): DE, GB, JP, US.

(22) Internationales Anmeldedatum:
4. Juli 2003 (04.07.2003)

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT,
BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR,
HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102 31 463.2 5. Juli 2002 (05.07.2002) DE

Erklärung gemäß Regel 4.17:

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu
beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii) für die
folgenden Bestimmungsstaaten DE, GB, JP, europäisches
Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR,
GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR)

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): LASER- UND MEDIZIN-TECHNOLOGIE
GMBH BERLIN [DE/DE]; Fabeckstrasse 60-62, 14195
Berlin (DE).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu ver-
öffentlichen nach Erhalt des Berichts

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): ASHKENASI, David
[DE/DE]; Glauberstrasse 19, 12209 Berlin (DE). ROSEN-
FELD, Arkadi [DE/DE]; Gubitzstrasse 48, 10409 Berlin
(DE). KNAPPE, Verena [DE/DE]; Motzstrasse 5, 10777
Berlin (DE). MÜLLER, Gerhard [DE/DE]; An der Re-
hwiese 8, 14129 Berlin (DE).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Ab-
kürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Co-
des and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der
PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: MICROSTRUCTURING OF AN OPTICAL WAVEGUIDES FOR PRODUCING FUNCTIONAL OPTICAL
ELEMENTS

(54) Bezeichnung: MIKROSTRUKTURIERUNG VON LICHTWELLENLEITERN ZUR ERZEUGUNG VON OPTISCHEN
FUNKTIONSELEMENTEN

(57) Abstract: The invention relates to a method for microstructuring an optical waveguide which comprises a first cross section area having a first refraction index, a second cross section area having a second refraction index and a limiting area which is disposed at the junction of the first and second cross section areas. The inventive method consists in exposing the optical waveguide to the effect of a laser beam which is embodied in the form of at least one individual ultrashort pulse or a pulse sequence with a given power input, thereby defining quantity of received energy. The optical waveguide is exposed to the effect of the laser beam in such a way that at least one optical property thereof is modified in at least one defined part of the limiting area

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters mit einem ersten Querschnittsbereich mit einem ersten Brechungsindex, einem zweiten Querschnittsbereich mit einem zweiten Brechungsindex, und einem Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten Querschnittsbereich, bei dem der Lichtwellenleiter mit Laserstrahlung in Form mindestens eines ultrakurzen Einzelpulses oder einer Pulsfolge mit definiertem Energieeintrag bestrahlt wird, wobei die Bestrahlung derart erfolgt, dass an mindestens einem definierten Abschnitt des Grenzbereiches eine Modifikation mindestens einer optischen Eigenschaft des Lichtwellenleiters eintritt.

WO 2004/005982 A2

Mikrostrukturierung von Lichtwellenleitern zur Erzeugung von optischen Funktionselementen

- Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters mit einem ersten Querschnittsbereich mit einem ersten Brechungsindex, einem zweiten Querschnittsbereich mit einem zweiten Brechungsindex und einem Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten Querschnittsbereich, bei dem der Lichtwellenleiter mit Laserstrahlung in Form mindestens
- 5 eines ultrakurzen Einzelpulses oder einer Pulsfolge mit definiertem Energieeintrag bestrahlt wird. Die Erfindung betrifft weiterhin ein optisches Funktionselement mit einem Lichtwellenleiter. Die Erfindung betrifft weiterhin eine Vorrichtung zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters mit Laserstrahlung.
- 10 Ein Verfahren der eingangs genannten Art ist aus der DE 197 39 456 bekannt. Danach wird mit einem Einzelpuls oder einer Pulsfolge mit einer definierten Zahl von Pulsen eine Modifikation in einem Kern eines Lichtwellenleiters erzeugt. Der Lichtwellenleiterkern ist von einem Lichtwellenleitermantel umge-

ben, dessen Material einen niedrigeren Brechungsindex als das des Lichtwellenleiterkerns aufweist. Die Pulsintensität ist so gewählt, dass mit jedem Einzelpuls die Zerstörschwelle überschritten wird. Durch eine Mikroexplosion im Material entstehen Streuzentren, die eine Abstrahlung eines Teils der im
5 Lichtwellenleiterkern geführten Strahlung in alle Richtungen bewirken. Aus dem Artikel Physical Review Letters, Vol. 74 (1995), Seiten 2248 bis 2251 ist es bekannt, für Materialveränderungen im Mikrometerbereich auf Grund des geringen Energieeintrages Laserpulse mit einer Dauer von einigen 10ns bis hinab in den Sub-Pikosekundenbereich zu verwenden.

10 Aus der US 6,384,977 ist die Erzeugung von Gitterstrukturen in einem Lichtwellenleiter bekannt. Der Lichtwellenleiter besteht aus einem fotosensitiven Material, das entsprechend der Gitterstruktur belichtet wird.

Das zuletzt genannte Verfahren hat den Nachteil, dass es nur bei fotosensitiven Lichtwellenleiter-Materialien anwendbar ist. Die weiteren genannten Ver-
15 fahren aus dem Stand der Technik ermöglichen keine gesteuerte Auskoppelung von Licht aus dem Wellenleiter oder Einkopplung von Licht in den Lichtwellenleiter. Das Verfahren der DE 107 39 456 ermöglicht lediglich eine Abstrahlung von Licht aus dem Lichtwellenleiter in alle radialen Richtungen.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Mikrostrukturierung eines
20 Lichtwellenleiters der Eingangs genannten Art anzugeben, das die genannten Nachteile nicht aufweist. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, ein optisches Funktionselement mit einem Lichtwellenleiter anzugeben, das eine (insbesondere richtungsselektive) Auskopplung von Licht aus einem Lichtwellenleiter oder Einkopplung von Licht in einen Lichtwellenleiter ermöglicht. Eine
25 weitere Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung zur Mikrostrukturierung eines Wellenleiters mit Laserstrahlung anzugeben, die die Herstellung von optischen Funktionselementen mit den genannten Eigenschaften ermöglicht.

Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird die Aufgabe gelöst durch ein Verfahren zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters mit einem ersten

Querschnittsbereich mit einem ersten Brechungsindex, einem zweiten Querschnittsbereich mit einem zweiten Brechungsindex, und einem Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten Querschnittsbereich, bei dem der Lichtwellenleiter mit Laserstrahlung in Form mindestens eines ultrakurzen Einzelpulses oder einer Pulsfolge mit definiertem Energieeintrag bestrahlt wird, wobei die Bestrahlung derart erfolgt, dass an mindestens einem definierten Abschnitt des Grenzbereiches eine Modifikation mindestens einer optischen Eigenschaft des Lichtwellenleiters eintritt.

Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass der Lichtwellenleiter nicht im Innern eines Querschnittsbereiches wie beispielsweise dem Kern des Lichtwellenleiters, sondern definiert im Grenzbereich zwischen dem ersten und dem zweiten Querschnittsbereich, also beispielsweise an der Grenzfläche zwischen Lichtwellenleiterkern und Lichtwellenleitermantel modifiziert wird. Bei dem ersten Querschnittsbereich kann es sich also beispielsweise um einen Lichtwellenleiter-Kern mit einem Brechungsindex n_1 und bei dem zweiten Querschnittsbereich um einen Lichtwellenleiter-Mantel mit einem Brechungsindex $n_2 < n_1$ handeln. Dabei erfolgt die Bestrahlung derart, dass an mindestens einem definierten Abschnitt des Grenzbereiches eine Modifikation mindestens einer optischen Eigenschaft des Lichtwellenleiters eintritt.

Als Veränderung einer optischen Eigenschaft des Lichtwellenleiters wird eine dauerhafte Veränderung eines Wertes eines optischen Parameters des Lichtwellenleiters verstanden. Ein solcher optischer Parameter ist beispielsweise der Brechungsindex des Materials des ersten oder des zweiten Querschnittsbereiches. Mit einer Änderung des Brechungsindex im Grenzbereich zwischen dem ersten und dem zweiten Querschnittsbereiches kann die Reflexion eines im ersten Querschnittsbereich geführten Lichtstrahls an der Grenzfläche zum zweiten Querschnittsbereich gezielt beeinflusst werden. Dies kann beispielsweise derart geschehen, dass anstelle einer Totalreflexion des im ersten Querschnittsbereich geführten Lichtes im modifizierten Abschnitt des Grenzbereiches lediglich eine Reflexion eines Teils der auf den Grenzbereich treffenden Lichtintensität stattfindet. Dies hat zur Folge, dass ein Teil des im

ersten Querschnittsbereich geführten Lichtes aus diesem ausgekoppelt wird. Je nach Anordnung und Ausbildung des modifizierten Abschnittes des Grenzbereiches kann dadurch eine Abstrahlung in einer bestimmten Richtung und in einem bestimmten Intensitätsverhältnis zur im Lichtwellenleiter geführten
5 Lichtintensität erzielt werden.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein Lichtwellenleiter auf mikroskopischer Skala strukturiert, der einen ersten Querschnittsbereich mit einem ersten Brechungsindex, einen zweiten Querschnittsbereich mit einem zweiten Brechungsindex und einen Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten
10 Querschnittsbereich hat. Den Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten Querschnittsbereich bildet im Idealfall eine Grenzfläche. Es versteht sich jedoch, dass eine Grenzfläche nur modifiziert werden kann, indem der Grenzbereich um die Grenzfläche herum modifiziert wird. Das heißt, es wird ein Abschnitt des ersten Querschnittsbereiches nahe der Grenzfläche oder ein
15 Abschnitt des zweiten Querschnittsbereiches nahe der Grenzfläche oder jeweils ein Abschnitt in beiden Querschnittsbereichen nahe der Grenzfläche modifiziert.

Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich jedoch nicht allein zur Anwendung bei der Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters mit einem stufenförmigen Brechungsindexprofil. Es kann ebenso bei einem Lichtwellenleiter mit einem kontinuierlichen Querschnittsprofil des Brechungsindex Verwendung
20 finden. Der Grenzbereich, in dem eine Modifikation mindestens einer optischen Eigenschaft des Lichtwellenleiters hervorgerufen wird, ist in diesem Fall ein im Voraus wählbarer Bereich in einem Tiefenabschnitt des Lichtwellenleiters. Die Modifikationen liegen in diesem Fall also unterhalb der Oberfläche in dem Lichtwellenleiter mit Gradientenindex-Profil.
25

Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung besteht die Modifikation mindestens einer optischen Eigenschaft des Lichtwellenleiters in der Schaffung eines Streuzentrums durch eine Mikroschädigung oder durch einen Ma-

terialabtrag im Grenzbereich. Ein Materialabtrag kann beispielsweise durch eine Mikroexplosion erfolgen.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist die Modifikation eine Transformation der Phase des Materials des ersten oder Materials des zweiten Querschnittsbereiches oder der Phase
5 beider Querschnittsbereiche.

Die kontrollierte Erzeugung einer Modifikation gemäß den vorgenannten Ausführungsformen, also Brechungsindexänderung, Erzeugung eines Streuzentrums durch Mikroschädigung oder Phasentransformation, gelingt in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des Verfahrens, in dem die Laserstrahlung
10 derart gewählt ist, dass am für die Modifikation vorgesehenen definierten Abschnitt des Grenzbereiches ein Ladungsträgerplasma, beispielsweise ein Elektronenplasma, mit einer von der gewünschten Modifikation abhängigen Ladungsträgerdichte erzeugt wird.

Da der Energietransfer aus dem Laserstrahl in das Material und somit die Materialreaktion oder Materialmodifikation vom induzierten Plasma abhängig ist, ist für eine Steuerung der Plasmadichte ein Einsatz geeigneter Laserimpulse erforderlich. Die Wechselwirkung zwischen der Laserstrahlung und dem Material zur Herstellung von Lichtwellenleitern hängt stark von dem Verhältnis der
20 Energiedichte zur gewählten Leistungsdichte der betreffenden Laserstrahlung ab. Erst die Verwendung zeitlich modulierter Laserstrahlung erhöht das Verhältnis zwischen der Leistungsdichte und der Energiedichte eines Laserimpulses (auch als „Einzelpuls“ bezeichnet). Um die erfindungsgemäß vorgesehenen Modifikationen im Grenzbereich zu erzielen, ist es notwendig, mit hoher
25 Leistungsdichte bei geringer Energiedichte zu arbeiten und so die Voraussetzung für eine Steuerung der Plasmadichte zu schaffen.

Die mit ultra-kurzen Laserimpulsen erzielbare hohe Leistungsdichte des Laserstrahls induziert am definierten Ort im Grenzbereich oder im Materialinnern nicht-lineare optische Effekte der Anregung, so dass eine sehr lokale Energie-

einwirkung im ansonsten transparenten Material erfolgt. Abhängig von der Materialkombination und der Leistungsdichte des Laserstrahls können so am definierten Ort Veränderungen in optischen Eigenschaften erzielt werden, die auch als Modifikationen bezeichnet werden.

- 5 Vorzugsweise weist die Laserstrahlung daher eine Leistungsdichte von etwa 10^{10} W/cm² oder von mehr als 10^{10} W/cm² auf. In diesem Leistungsdichten-Bereich wird eine effiziente Einkopplung der Laserenergie überwiegend über nicht lineare optische Effekte wie Multiphotonen-Absorption, Tunnel- und Kaskadenionisation bewirkt.
- 10 Die genannte Leistungsdichte kann bei entsprechender Fokussierung der Laserstrahlung mit Laserimpulsen einer Dauer von 10^{-10} s und einer Energie von etwa 10 Nanojoule (nJ) oder weniger als 10 nJ erreicht werden. Die Pulslänge wird entsprechend der gewünschten Plasmadichte gewählt. Vorzugsweise liegen verwendete Laserimpulsdauern zwischen 0,1 und 50 Pikosekunden
- 15 (ps).

- Vorzugsweise ist dabei die Wellenlänge der Laserstrahlung so gewählt, dass der Lichtwellenleiter im Lichtweg bis zum definierten Abschnitt des Grenzbe-
- 20 reiches für Licht der gewählten Wellenlänge bis zu einer für die Plasmadichtesteuerung kritischen Leistungsdichte, also beispielsweise der genannten Leistungsdichte von etwa 10^{10} W/cm² durchlässig oder teildurchlässig ist. Das Bauteil bleibt demnach auf dem Lichtweg durchsichtig, bis die Laserstrahlung auf Grund der zunehmenden Fokussierung eine Leistungsdichte im genannten Bereich erreicht. Die Wahl der Lichtwellenlänge ist demnach auch vom jeweiligen Material der durchstrahlten Querschnittsbereiche abhängig.

- 25 Die Fokussierung des Laserstrahls auf den definierten Abschnitt des Grenzbeereiches erfolgt vorzugsweise mit Hilfe eines Mikroskopobjektives.

In einer bevorzugten Variante des Verfahrens wird ein Laserstrahl so eingestrahlt, dass er unter einem Winkel von 90° zu einer Außenfläche des Licht-

wellenleiters am Auftreffpunkt in den Lichtwellenleiter eintritt. Jedoch sind auch andere Ausführungsformen der Laserstrahlführung denkbar. Der Laserstrahl kann auch unter einem anderen Winkel in den Lichtwellenleiter eintreten. Anstelle eines Mikroskopobjektives oder in Ergänzung dazu kann auch
5 mit einer Spiegeloptik eine Fokussierung des Laserstrahls im definierten Abschnitt des Grenzbereiches erzielt werden. Es kommt allein auf eine für eine Plasmadichtesteuerung ausreichende Leistungsdichte am definierten Abschnitt des Grenzbereiches an.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird ein Laserstrahl durch eine Immissionsflüssigkeit geleitet, bevor er in den Lichtwellenleiter eintritt.
10

Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird der Laserstrahl relativ zum Lichtwellenleiter oder der Lichtwellenleiter relativ zum Laserstrahl bewegt. Damit wird eine maschinelle Herstellung auch komplizierterer Modifikationsstrukturen erzielbar. Der Lichtwellenleiter kann beispielsweise relativ zum Laserstrahl gedreht und/oder in seiner Längsrichtung verschoben werden. Auf diese Weise können Modifikationen an beliebiger Stelle des Grenzbereiches in beliebiger Form sowohl nur als Brechungsindexänderung als auch in Form massiver Streuzentren als auch in Form von Phasentransformationen oder als Kombination von zwei oder allen drei genannten
15 20 Modifikationen ausgeführt werden.

Bei einem Lichtwellenleiter, der im Querschnitt gesehen von innen nach außen mehr als zwei Querschnittsabschnitte mit unterschiedlichen Brechungsindex aufweist und dementsprechend auch mehrere Grenzbereiche benachbarter Querschnittsabschnitte umfasst, können durch entsprechende Variationen der Fokussierung Modifikationen an mehr als einem Grenzbereich angeordnet werden.
25

Dasselbe gilt für einen Lichtwellenleiter mit einem kontinuierlichen Querschnittsprofil des Brechungsindex. Auch hier können durch unterschiedliche

Fokussierung Modifikationen in mehreren zuvor gewählten Querschnittsab-
schnitten erfolgen. Es versteht sich, dass diese Querschnittsbereiche bei einer
solchen Gradientenindex-Faser dem Grenzbereich der Ausführungsformen
der Erfindung entsprechen, die die Modifikation in einem Lichtwellenleiter mit
5 einem stufenförmigen Brechungsindexprofil bewirken.

Mit dem erfindungsgemäßen Mikrostrukturierungsverfahren können optische
Funktionselemente hergestellt werden. Die Anordnung und Struktur der Modi-
fikationen hängt vom gewünschten Funktionselement ab.

10 So ist in einer Ausführungsform der Erfindung vorgesehen, die Modifikationen
circumferent anzuordnen, so dass bei einem Auskoppelement eine definierte
Abstrahlung in radialer Richtung in einem definierten Längsabschnitt des
Lichtwellenleiters erfolgt. Dies kann beispielsweise bei einem Streulichtappli-
kator vorgesehen sein, wie er in der Medizintechnik zum Eintrag von Laserlicht
in Gewebe eingesetzt wird.

15 Eine andere Ausführungsform sieht vor, die Modifikationen im Lichtwellenleiter
definiert punktuell an einer ausgesucht begrenzten Stelle einzuführen, so dass
eine Abstrahlung nur in einer Richtung erfolgt, oder dass diese Stelle als Ein-
koppelement dienen kann. Weiter mögliche Ausführungen der Modifikatio-
nen an der Grenzfläche Faserkern-Fasermantel sind Linien, Kreisbögen und
20 Flächen unter definiertem Winkel und Längen, sowie Kombinationen dieser
Ausführungsformen.

Entsprechend einem zweiten Aspekt der Erfindung liegt die Lösung der oben
genannten Aufgabe in einem optischen Funktionselement mit einem Lichtwel-
lenleiter, der einen ersten Querschnittsbereich mit einem ersten Brechungsindex,
25 einen zweiten Querschnittsbereich mit einem zweiten Brechungsindex,
und einen Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten Querschnitts-
bereich hat, wobei mindestens ein definierter Abschnitt des Grenzbereiches
mit einer Modifikation mindestens einer optischen Eigenschaft des Lichtwel-
lenleiters vorgesehen ist.

Das erfindungsgemäße optische Funktionselement zeichnet sich dadurch aus, dass die Modifikation in einem Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten Querschnittsbereich vorgesehen ist. Auf diese Weise können die Einkopplung von Laserstrahlung in den Lichtwellenleiter oder die Auskopplung von Laserstrahlung aus dem Lichtwellenleiter oder beides lokal mit mikroskopischer Genauigkeit beeinflusst werden. Es kann durch eine entsprechende Wahl der Modifikation der optischen Eigenschaften im Grenzbereich weiterhin gezielt auf die Richtungsabhängigkeit einer Einkopplung oder Auskopplung von Laserstrahlung Einfluss genommen werden. In einem weiteren Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen optischen Funktionselementes ist eine Modifikation an einer Vielzahl definierter Abschnitte des Grenzbereiches derart vorgesehen, dass von den modifizierten Grenzbereichsabschnitten eine radiale Abstrahlung definierter, gleichmäßiger Lichtintensität erfolgt, wenn an einem Längsende Licht in den Lichtwellenleiter eingekoppelt wird.

In einem weiteren Ausführungsbeispiel des optischen Funktionselements der Erfindung, ist die Modifikation an einer Vielzahl definierter Abschnitte des Grenzbereiches in Längsrichtung des Wellenleiters oder in einer Richtung senkrecht dazu oder in beiden genannten Richtungen des Lichtwellenleiters derart angeordnet, dass ein optisches Gitter, eine Spirale, ein Kreuz, eine photonische Bandgapstruktur, eine Kombination aus Linien und Punkten, oder eine Kombination der vorgenannten Strukturen vorliegt.

Der Lichtwellenleiter kann beispielsweise Materialien wie Quarz, Glas, Glaskeramik, einem oder mehreren Kunststoffen, Fluoriden, oder ähnliche transparente Materialien, oder Materialkombinationen enthalten.

Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung wird die Aufgabe gelöst durch eine Vorrichtung zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters mit Laserstrahlung, wobei ein zur Abgabe mindestens eines Lichtimpulses ausgebildeter Laser und eine Fokussiereinrichtung vorgesehen ist derart, dass in einem vor-einstellbaren Tiefenabschnitt eines Lichtwellenleiters Laserstrahlung mit einer

Leistungsdichte der von etwa 10^{10} W/cm² oder von mehr als 10^{10} W/cm² einstrahlen kann.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Vorrichtung nach dem dritten Aspekt der Erfindung ist der Laser ausgebildet, Lichtimpulse mit einer Dauer von
5 maximal etwa 10^{-10} Sekunden, vorzugsweise 0,1 bis 50 ps abzugeben. Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist der Laser ausgebildet, Lichtimpulse mit einer Energie von etwa 10 nJ oder weniger als 10 nJ abzugeben. Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist die Frequenz der Laserstrahlung dem Material des Lichtwellenleiters auf dem durchstrahlen Lichtweg
10 im Lichtwellenleiter entsprechend so gewählt ist, dass nur in dem definierten Tiefenabschnitt Laserstrahlung mit einer Leistungsdichte der von etwa 10^{10} W/cm² oder von mehr als 10^{10} W/cm² einstrahlen kann.

Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist eine Halterung für einen Lichtwellenleiter vorgesehen, die ausgebildet ist, den Lichtwellenleiter so zu
15 lagern, dass er in seiner Längsrichtung verschiebbar ist oder um seiner Längsachse drehbar ist, oder beides. Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist die Fokussiereinrichtung zur Durchführung einer oder mehrerer der folgenden Bewegungen gelagert: einer Verschiebung in Richtung des Abstandes vom Lichtwellenleiter oder in Längsrichtung des Lichtwellenleiters,
20 oder einer Drehung um seine Längsachse.

Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezug auf die Zeichnung anhand von Ausführungsbeispielen näher beschrieben. Es zeigen:

- Figur 1 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters,
- 25 Figur 2 eine Mikroskopaufnahme einer mit dem erfindungsgemäßen Verfahren modifizierten Quarzglasfaser

Figur 3 eine Aufnahme modifizierter Bereiche einer Quarzglasfaser, an deren Längsende Licht eingekoppelt wird

Figur 4 ein Diagramm der abgestrahlten Leistung der Faser aus Figur 3 im Verhältnis zur in die Faser eingekoppelten Leistung in Abhängigkeit vom Modifikationsort.

5

Figur 1 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters. Es handelt sich bei der Figur 1 um eine Prinzipskizze. Ein Laser L sendet einen Laserstrahl aus. Der Laserstrahl ist durch Randstrahlen R1 und R2 sowie durch einen Pfeil 1 dargestellt, der die Strahlrichtung anzeigt. Der Laserstrahl wird mit Hilfe eines Mikroskopobjektives 2 auf einen Lichtwellenleiter LWL geleitet. Der Lichtwellenleiter weist im vorliegenden Ausführungsbeispiel einen Lichtwellenleiter-Mantel 3 und einen Lichtwellenleiter-Kern 4 auf. Der Mantel 3 ist aus einem Material mit einem geringeren Brechungsindex als der Kern 4 ausgebildet. Im Übergang von Mantel 3 zu Kern 4 befindet sich ein Grenzbereich 7, der hier auch als Grenzfläche bezeichnet wird.

10

15

20

Der Abstand zwischen dem Mikroskopobjektiv 2 und dem Lichtwellenleiter LWL ist justierbar, was durch den Doppelpfeil 5 symbolisiert wird. Der Lichtwellenleiter LWL ist um seine Längsachse drehbar gelagert, was durch den Doppelpfeil 6 symbolisiert wird. Das Mikroskopobjektiv 2 ist in Längsrichtung des Lichtwellenleiters verschiebbar.

25

Durch Variation des Abstandes des Mikroskopobjektives 2 von der Grenzfläche 7 kann die gewünschte Intensität und der günstigste Bereich im Übergang zwischen Lichtwellenleiter-Kern und Lichtwellenleiter-Mantel eingestellt werden. Je nach gewünschter Modifikation kann die neben der Fokussierung auch die Intensität des Laserstrahls entsprechend eingestellt werden. Beispielsweise können Abschwächungselemente wie Graufilter Verwendung finden.

Durch eine Rotation 6 des Lichtwellenleiters LWL kann die Modifikation mit einer Ausdehnung in Umfangsrichtung des Lichtwellenleiters LWL erzeugt werden. Eine solche Modifikation wird auch als radiale Modifikation bezeichnet. Durch Verschieben des Mikroskopobjektivs kann eine Modifikation mit
5 einer Ausdehnung in Längsrichtung des Lichtwellenleiters LWL erzeugt werden.

Figur 2 zeigt in einer Mikroskopaufnahme ein Ausführungsbeispiel eines Lichtwellenleiters 10. Bei dem Lichtwellenleiter 10 handelt es sich um eine Quarzglasfaser mit einem Kern von 600 Mikrometer Durchmesser und einem
10 Mantel von 660 Mikrometern Durchmesser. Die Längsrichtung des Lichtwellenleiters 10 erstreckt sich in Figur 2 von der linken zur rechten Bildseite. Für die dargestellte Aufnahme wurde der Lichtwellenleiter quer zur Längsrichtung durchstrahlt. Unterschiedlich helle, vom linken zum rechten Bildrand reichende Querstreifen im Bild sind in erster Linie auf die Durchstrahlung zurückzuführen.
15

Zwischen einem oberen Faserrand 12 und einem unteren Faserrand 14 sind vertikale, dunkle Streifen in regelmäßigem Abstand in Längsrichtung der Faser erkennbar. Es handelt sich bei diesen Streifen um Modifikationen. Im Durchlicht des Mikroskops erscheinen sie dunkler als die nicht modifizierten
20 Längsabschnitte der Faser. Als Beispiele sind Modifikationen 16 und 18 markiert.

Zur Erzeugung der Modifikationen wurden Laserpulse einer Wellenlänge von 800 nm, einer Impulsdauer von 0,2 Pikosekunden, einer Einzelpulsenergie von 2,3 μ J und einer Wiederholrate von 1 kHz verwendet. Die Modifikationen
25 wurden durch Verschieben des Mikroskopobjektivs (40X, NA=0,63) in Richtung des Faserkerns in unterschiedlicher Tiefe vorgenommen. Die größere Tiefe der Modifikationen auf der rechten Bildseite ist beispielsweise an der Modifikation 18 erkennbar, die in der Aufnahme der Figur 3 unscharf erscheint. Scharf erscheint dagegen die Modifikation 16, die bei der Aufnahme
30 im Fokus des Mikroskops war.

Figur 3 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Quarzglasfaser 20 mit Laser-induzierten Modifikationen. Auch die Quarzglasfaser 20 hat einen Kern von 600 Mikrometer Durchmesser und einen Mantel von 660 Mikrometern Durchmesser. Modifikationen wurden hier mit Hilfe von Laserimpulsen einer Grundwellenlänge von 800 nm, einer Impulsdauer von 3 Pikosekunden und einer Einzelpulsenergie von 3,8 μ J erzielt. Die Modifikationen erfolgten mit einem Abstand in Längsrichtung von 10 Mikrometern über den gesamten Umfang der Faser 20.

Die Aufnahme der Figur 3 zeigt das Abstrahlen von Licht aus den modifizierten Bereichen der Quarzglasfaser. Hierzu wurde an einem Ende der Faser ein Helium-Neon-Laser eingekoppelt. Deutlich erkennbar sind modifizierte Bereiche 22, 24 und 26, die in Längsrichtung der Faser hintereinander angeordnet sind. Zwischen den modifizierten Bereichen 22 und 24 ist ein kurzer Abschnitt 28 mit einer geringen Anzahl von Modifikationen angeordnet. Zwischen den Abschnitten 24 und 26 ist ein weiterer kurzer Abschnitt 30 mit einer geringeren Anzahl Modifikationen angeordnet. Die Bereiche 28 und 30 sind daran zu erkennen, dass aus ihnen eine geringere Abstrahlung erfolgt und sie daher in Figur 3 dunkler erscheinen. Am linken und rechten Bildrand sind in Verlängerung der modifizierten Bereiche jeweils dunkle Abschnitte 32 und 34 erkennbar, in denen die Faser nicht modifiziert wurde.

Figur 4 zeigt ein Diagramm, in dem auf der Ordinate (Y-Achse) die gesamte abgestrahlte Leistung der Faser 20 aus Figur 3 im Verhältnis zu der in die Faser eingekoppelten Leistung des Laserstrahls des Helium-Neon-Lasers dargestellt ist. Auf der Abszisse (X-Achse) ist der Abstand in Längsrichtung des Messpunktes von einem Längsende des modifizierten Bereichs der Faser aufgetragen. Die Abstrahlung in radialer Richtung setzt von hohen Abständen her kommend (entsprechend der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls in der Faser) bei einem Abstand von 10 mm ein und erreicht bei einem Abstand von etwa 7 mm ein Maximum. Zu geringen Abstandswerten hin nimmt die radial abgestrahlte Intensität ab und hat am Ende des Modifikationsbereiches eine relative Intensität von nur noch 10 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die

Abstrahlung in den modifizierten Bereichen, die näher zum Helium-Neon-Laser liegen, so hoch ist, dass ein beträchtlicher Anteil der eingestrahlten Leistung auf Grund der radialen Abstrahlung in diesen Breichen aus der Faser ausgekoppelt wird. Mit größerer Entfernung vom Helium-Neon-Laser sinkt
5 daher auch zwangsläufig die relative Intensität des ausgekoppelten Laserlichtes.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters mit einem ersten Querschnittsbereich mit einem ersten Brechungsindex, einem zweiten Querschnittsbereich mit einem zweiten Brechungsindex, und einem Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten Querschnittsbereich,
5 bei dem der Lichtwellenleiter mit Laserstrahlung in Form mindestens eines ultrakurzen Einzelpulses oder einer Pulsfolge mit definiertem Energieeintrag bestrahlt wird,
10 dadurch gekennzeichnet, dass die Bestrahlung derart erfolgt, dass an mindestens einem definierten Abschnitt des Grenzbereiches eine Modifikation mindestens einer optischen Eigenschaft des Lichtwellenleiters eintritt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Modifikation eine Änderung des Brechungsindexes des Materials des ersten oder des zweiten Querschnittsbereiches oder beider ist.
15
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Modifikation die Schaffung eines Streuzentrums durch eine Mikroschädigung oder durch einen Materialabtrag ist.
- 20 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem die Modifikation eine Transformation der Phase des Materials des ersten oder des zweiten Querschnittsbereiches oder beider ist.
5. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Laserstrahlung derart gewählt ist, dass am definierten Abschnitt des Grenzbereiches ein Ladungsträgerplasma mit einer von der gewünschten Modifikation abhängigen Ladungsträgerdichte erzeugt wird.
25

6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem die Laserstrahlung eine Leistungsdichte von etwa 10^{10} W/cm^2 oder von mehr als 10^{10} W/cm^2 aufweist.
7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem die Laserstrahlung Einzelimpulse einer Dauer von etwa 10^{-10} Sekunden oder von zwischen 0,1 ps und 50 ps und einer Energie von etwa 10 Nanojoule (nJ) oder weniger als 10 Nanojoule (nJ) aufweist.
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, bei dem die Wellenlänge der Laserstrahlung so gewählt ist, dass der Lichtwellenleiter im Lichtweg bis zum definierten Abschnitt des Grenzbereiches für Licht der gewählten Wellenlänge bis zu einer Leistungsdichte von etwa 10^{10} W/cm^2 transparent ist.
9. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem ein Laserstrahl mit Hilfe eines Mikroskopobjektives auf den definierten Abschnitt des Grenzbereiches fokussiert wird.
10. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem ein Laserstrahl so eingestrahlt wird, dass er unter einem Winkel von 90° zu einer Außenfläche des Lichtwellenleiters am Auftreffpunkt in diesen eintritt.
11. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem ein Laserstrahl durch eine Immersionsflüssigkeit geleitet wird, bevor er in den Lichtwellenleiter eintritt.
12. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Modifikation derart erzeugt wird, dass an dem betreffenden Abschnitt des Grenzbereiches Licht aus dem Wellenleiter ausgekoppelt werden kann, oder dass Licht an dem betreffenden Abschnitt des Grenzbereiches in den Wellenleiter eingekoppelt werden kann, oder dass Licht an dem betreffenden Abschnitt des Grenzbereiches sowohl ein- als auch ausgekoppelt werden kann.

13. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Modifikation an einer Vielzahl definierter Abschnitte des Grenzbereiches derart erzeugt wird, dass von den modifizierten Grenzbereichsabschnitten eine radiale Abstrahlung definierter, gleichmäßiger Lichtintensität erfolgt, wenn an einem Längsende Licht in den Lichtwellenleiter eingekoppelt wird.
14. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Modifikation an einer Vielzahl definierter Abschnitte des Grenzbereiches in Längsrichtung des Lichtwellenleiters oder einer Richtung senkrecht dazu oder in beiden genannten Richtungen des Lichtwellenleiters derart angeordnet erzeugt wird, dass ein optisches Gitter, eine Spirale, ein Kreuz, eine photonische Bandgapstruktur, eine Kombination aus Linien und Punkten, oder eine Kombination der vorgenannten Strukturen entsteht.
15. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem der Lichtwellenleiter relativ zum Laserstrahl oder der Laserstrahl relativ zum Lichtwellenleiter bewegt wird.
16. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem der erste Querschnittsabschnitt ein Lichtwellenleiterkern und der zweite Querschnittsabschnitt ein Lichtwellenleitermantel ist.
17. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem der Lichtwellenleiter von innen nach außen mehr als zwei Querschnittsabschnitte mit unterschiedlichem Brechungsindex und eine entsprechende Anzahl von Grenzbereichen benachbarter Querschnittsabschnitte aufweist, und bei dem Modifikationen an mehr als einem Grenzbereich angeordnet werden.

18. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem der Lichtwellenleiter ein kontinuierliches Querschnittsprofil des Brechungsindex aufweist, und bei dem die Modifikation in mindestens einem vorausgewählten Querschnittsabschnitt erfolgt.
- 5 19. Verfahren zur Herstellung eines optischen Funktionselementes, gekennzeichnet durch die Durchführung eines Mikrostrukturierungsverfahrens nach einem der vorstehenden Ansprüche.
- 10 20. Optisches Funktionselement mit einem Lichtwellenleiter, der einen ersten Querschnittsbereich mit einem ersten Brechungsindex, einen zweiten Querschnittsbereich mit einem zweiten Brechungsindex, und einen Grenzbereich im Übergang vom ersten zum zweiten Querschnittsbereich hat, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein definierter Abschnitt des Grenzbereiches mit einer Modifikation mindestens einer optischen Eigenschaft des Lichtwellenleiters vorgesehen ist.
- 15 21. Optisches Funktionselement nach Anspruch 20, bei dem die Modifikation eine Änderung des Brechungsindex des Materials des ersten oder des zweiten Querschnittsbereiches oder beider ist.
- 20 22. Optisches Funktionselement nach Anspruch 20 oder 21, bei dem die Modifikation die Schaffung eines Streuzentrums durch eine Mikroschädigung oder durch einen Materialabtrag ist.
23. Optisches Funktionselement einem der Ansprüche 20 bis 22, bei dem die Modifikation eine Transformation der Phase des Materials des ersten oder des zweiten Querschnittsbereiches oder beider ist.
- 25 24. Optisches Funktionselement einem der Ansprüche 20 bis 23, bei dem die Modifikation derart ausgebildet ist, dass an dem betreffenden Abschnitt des Grenzbereiches Licht aus dem Wellenleiter ausgekoppelt werden kann, oder dass Licht an dem betreffenden Abschnitt des

Grenzbereiches in den Wellenleiter eingekoppelt werden kann, oder dass Licht an dem betreffenden Abschnitt des Grenzbereiches sowohl ein- als auch ausgekoppelt werden kann.

- 5 25. Optisches Funktionselement einem der Ansprüche 20 bis 24, bei dem die Modifikation an einer Vielzahl definierter Abschnitte des Grenzbereiches derart vorgesehen ist, dass von den modifizierten Grenzbereichsabschnitten eine radiale Abstrahlung definierter, gleichmäßiger Lichtintensität erfolgt, wenn an einem Längsende Licht in den Lichtwellenleiter eingekoppelt wird.
- 10 26. Optisches Funktionselement einem der Ansprüche 20 bis 25, bei dem die Modifikation an einer Vielzahl definierter Abschnitte des Grenzbereiches in Längsrichtung des Lichtwellenleiters oder einer Richtung senkrecht dazu oder in beiden genannten Richtungen des Lichtwellenleiters derart angeordnet ist, dass ein optisches Gitter, eine Spirale, ein Kreuz,
15 eine photonische Bandgapstruktur, eine Kombination aus Linien und Punkten, oder eine Kombination der vorgenannten Strukturen entsteht.
- 20 27. Vorrichtung zur Mikrostrukturierung eines Lichtwellenleiters mit Laserstrahlung, dadurch gekennzeichnet, dass ein zur Abgabe mindestens eines Lichtimpulses ausgebildeter Laser und eine Fokussiereinrichtung vorgesehen sind derart, dass in einem voreinstellbaren Tiefenabschnitt eines Lichtwellenleiters Laserstrahlung mit einer Leistungsdichte von etwa 10^{10} W/cm^2 oder von mehr als 10^{10} W/cm^2 einstrahlen kann.
- 25 28. Vorrichtung nach Anspruch 27, bei der der Laser ausgebildet ist, Lichtimpulse mit einer Dauer von maximal etwa 10^{-10} Sekunden oder von zwischen 0,1 und 50 ps abzugeben.
29. Vorrichtung nach Anspruch 28, bei der der Laser ausgebildet ist, Lichtimpulse mit einer Energie von etwa 10 Nanojoule (nJ) oder weniger als 10 Nanojoule (nJ) abzugeben.

30. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 27 bis 29, bei der die Frequenz der Laserstrahlung dem Material des Lichtwellenleiters auf dem durchstrahlen Lichtweg im Lichtwellenleiter entsprechend so gewählt ist, dass nur in dem definierten Tiefenabschnitt Laserstrahlung mit einer Leistungsdichte der von etwa 10^{10} W/cm² oder von mehr als 10^{10} W/cm² einstrahlen kann.
31. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 27 bis 30, mit einer Halterung für einen Lichtwellenleiter, die ausgebildet ist, den Lichtwellenleiter so zu lagern, dass er in seiner Längsrichtung verschiebbar ist oder um seiner Längsachse drehbar ist, oder beides.
32. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 27 bis 31, bei der die Fokussiereinrichtung ein Mikroskopobjektiv ist.
33. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 27 bis 32, bei der die Fokussiereinrichtung zur Durchführung einer oder mehrerer der folgenden Bewegungen gelagert ist: einer Verschiebung in Richtung des Abstandes vom Lichtwellenleiter oder in Längsrichtung des Lichtwellenleiters, oder einer Drehung um seine Längsachse.
34. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 27 bis 33, bei der der Lichtwellenleiter und die Fokussiereinrichtung derart angeordnet sind, dass ein Laserstrahl unter einem Winkel von 90° zu einer Außenfläche des Lichtwellenleiters am Auftreffpunkt in diesen eintritt.

BEST AVAILABLE COPY

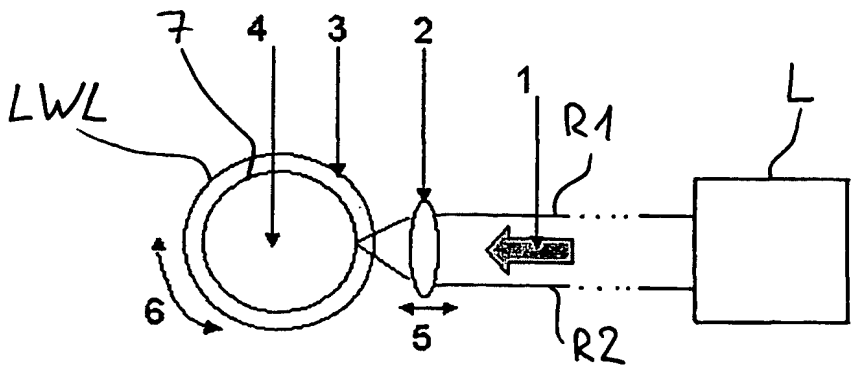


Fig. 1

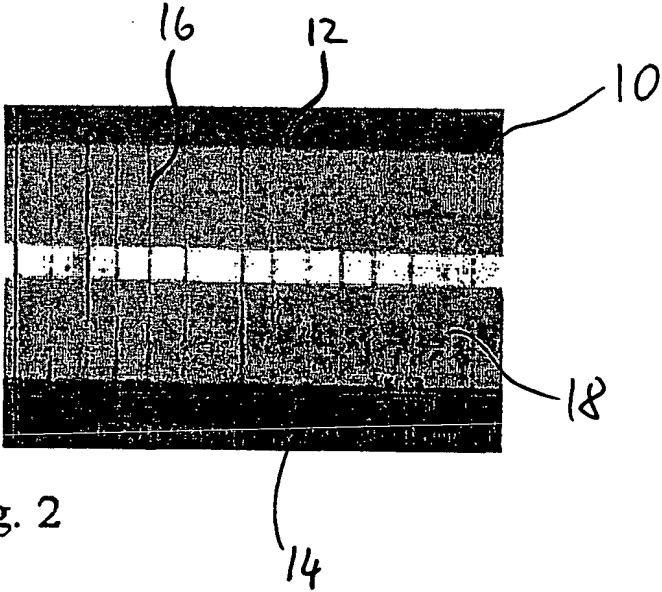


Fig. 2

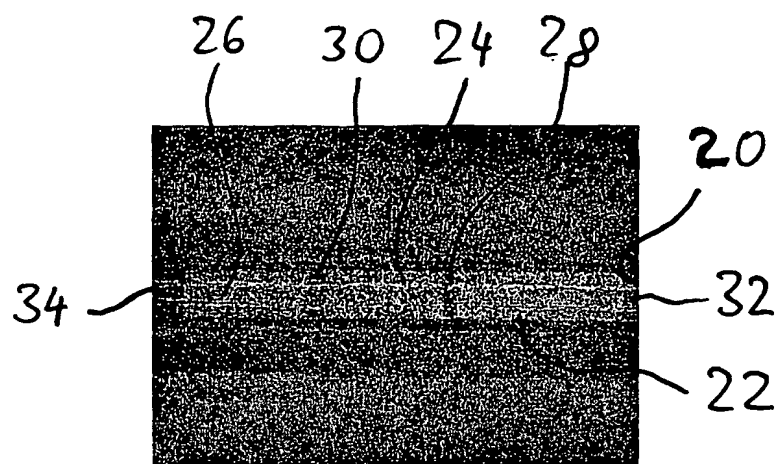


Fig. 3

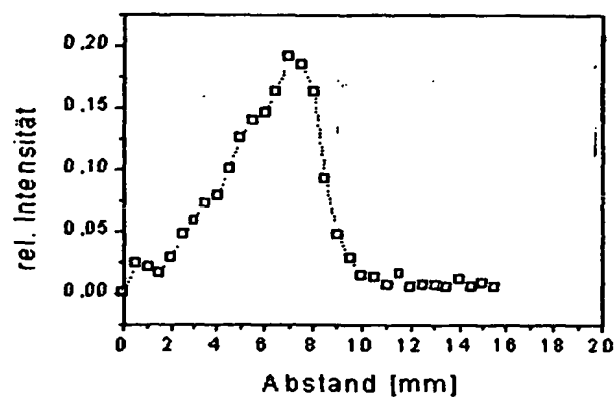


Fig. 4